تعیین تجربی مقدار و توزیع تنش‌های پسماند در جوش چند پاسه‌ی محیطی لوله‌ی فولادی ترمومکانیکال*

(یادداشت پژوهشی)

مجید سبک روح[۱] سید حجت هاشمی[۲] محمدرضا فراهانی[۳]

چکیده *در این تحقیق ابتدا دو قطعه لوله‌ی ۵٦ اینچ فولادی (از نوع درز جوش مارپیچ) با گرید ایکس ۷۰ و ضخامت ۰/۷۸۰ اینچ بر اساس دستورالعمل ویژه‌ی شرکت ملی گاز ایران جوشکاری گردید. پس از آن، آزمون کرنش‌سنجی سوراخ در روی سطوح خارجی و داخلی لوله بر اساس استاندارد ASTM E 837 انجام شد. سپس مقادیر تنش پسماند با استفاده از این اطلاعات محاسبه گردید. نتایج تجربی نشان می‌دهد حداکثر تنش پسماند کششی (۳۱۸ مگاپاسکال) در مرکز درز جوش در راستای محیطی سطح خارجی لوله به‌وجود می‌آید. هم‌چنین حداکثر تنش پسماند فشاری (۱۳۷ مگاپاسکال) در راستاهای محیطی و محوری سطح داخلی لوله و در فاصله‌ی ۳۰ میلی‌متر از مرکز جوش قرار دارد.*

واژه‌های کلیدی تنش پسماند، جوش چند پاسه‌ی محیطی، لوله‌ی فولادی انتقال گاز، کرنش‌سنجی سوراخ، API X70.

Experimental Determination of Residual Stresses in Multi-Pass Girth Welding of Thermo-Mechanical Steel Pipe

M. Sabokrouh S.H. Hashemi M.R. Farahani

Abstract *In this paper, two API X70 steel pipes (with spiral seam weld) of 56 inch outside diameter and 0.780 inch wall thickness were girth welded first. Next, hole drilling tests were conducted for strain measurement on the surfaces of the pipes. The values of residual stresses on the internal and external surfaces of the pipe were determined, from strain data using ASTM 837 standard. The experimental data showed that the maximum tensile residual stress (318MPa) was located on the centre line of the weld gap on the pipe outer surface alongside with the pipe hoop direction. Moreover, the maximum compressive (hoop and axial) residual stresses (137MPa) occurred on the pipe inner surface at 30mm from the centre line of the weld gap.*

Key Words Residual stress, multi-pass girth weld, thermomechanical steel pipe, natural gas transmission, hole drilling, API X70.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۱/٦/۱۸ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۲/۲٤ می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسؤول: استادیار گروه مکانیک، دانشکده فنی امیرکبیر، دانشگاه فنی و حرفه‌ای.

(۲) استاد، گروه مکانیک، دانشگاه بیرجند.

(۳) استادیار، دانشکده مکانیک، پردیس فنی، دانشگاه تهران.

مقدمه

خطوط لوله‌ی انتقال نفت و گاز ایران طولانی‌ترین شبکه لوله‌ی انتقال نفت و گاز در منطقه خاورمیانه را تشکیل می‌دهد [۱]. جوشکاری سر به سر (محیطی) حدود ۲۵ درصد زمان کل ایجاد یک خط جدید لوله انتقال را تشکیل می‌دهد و برای انجام آن به بالاترین درجه‌ی مهارت (درجه مهارت ۱) نیاز می‌باشد [2]. ممکن است جوش بدون عیب باشد ولی بسیاری از عناصر شیمیایی آن سوخته باشد [۳]. بنابر این جوش علاوه بر کیفیت ظاهری باید سالم نیز باشد. به این علت علاوه بر آزمون‌های غیر مخرب، نیاز به تأیید سلامت به‌وسیله‌ی آزمون‌های مخرب می‌باشد [٤]. این آزمون‌ها می‌توانند به‌صورت نسبی سلامت جوش را ارزیابی نمایند؛ اما برای آگاهی بیشتر از سلامت جوش، نیاز به آزمایش‌های تکمیلی به‌ویژه آزمون اندازه‌گیری تنش‌های پسماند می‌باشد. این مطلب با توجه به ویژگی و حساسیت فولادهای کم کربن پر استحکام (HSLA) که در خطوط لوله‌ی انتقال گاز طبیعی استفاده می‌شود، اهمیت بیشتری می‌یابد. در این گونه فولادها عناصر میکروآلیاژی مانند تیتانیوم، وانادیم و نیوبیوم تمایل بسیار زیادی به ترکیب با کربن و نیتروژن موجود زمینه دارند. این عناصر باعث تشکیل ذرات ریز کاربید، نیترید و کربونیترید می گردند و به‌طور مؤثری استحکام را افزایش می‌دهند، اما چنان‌چه به میزان حرارت ورودی آن‌ها در حین فرآیند جوشکاری و عملیات حرارتی قبل و بعد از آن توجه نشود عواقب تأثیرگذاری را (مانند حل شدن و قرار گرفتن با توزیع غیریکنواخت که باعث کاهش شدید خواص مکانیکی می‌شود) به‌همراه خواهد داشت [5]. تنش‌های پسماند به آن دسته از تنش‌ها اطلاق می‌شود که پس از انجام عملیات خاصی در جسم باقی می‌مانند و ناشی از بارگذاری خارجی نباشند. تنش‌های پسماند در حالت خودتعادلی (self equilibrium) هستند و برآیند نیروها و کوپل‌های حاصل از این تنش‌ها صفر می‌باشد. بزرگی و توزیع تنش‌های پسماند قبل از ساخت مشخص نیست و معمولاً به‌صورت کامل در طراحی در نظر گرفته نمی‌شود [٦]. تنش‌های پسماند ناشی از فرآیند جوشکاری از نوع تنش‌های حرارتی هستند. این تنش‌ها در منطقه‌ی جوش از نوع کششی هستند و ممکن است در حد تنش تسلیم فلز پایه باشند [7]. سطح این تنش‌ها در ناحیه‌ی متأثر از حرارت با افزایش فاصله از مرکز جوش به سمت تشکیل تنش‌های فشاری برای متعادل کردن تنش‌های کششی میل می‌کند. در مقاطع نازک سطح این تنش‌ها در جهت ضخامت ناچیز و قابل صرف نظر کردن می‌باشد [۸]. نتایج بررسی انجام شده توسط مؤسسات و محققان در مورد توزیع تنش‌های پسماند جوشی در راستای محوری یک اتصال محیطی (سر به سر) لوله، نشان‌دهنده‌ی تغییرات گسترده‌ای در مقدار و توزیع این تنش‌ها است [9]. آزمون‌های اندازه‌گیری تنش‌های پسماند به سه گروه روش‌های کاملاً مخرب، روش‌های غیرمخرب و روش‌های نیمه‌مخرب تقسیم می‌شوند [10]. کرنش‌سنجی سوراخ به‌عنوان یک روش نیمه‌مخرب با گستره‌ی کاربرد حدود ۲۲ درصد، مرسوم‌ترین روش اندازه‌گیری تنش پسماند است و برای تعیین تنش پسماند در نزدیک سطح جسم به‌کار می‌رود [11]. این روش شامل نصب کرنش‌سنج، ایجاد یک سوراخ در نزدیکی کرنش‌سنج‌ها و اندازه‌گیری کرنش آزاد شده است [12].

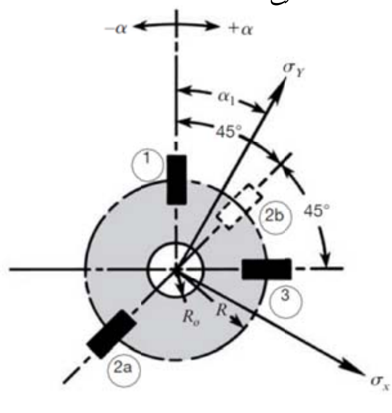
پیشینه‌ی تحقیق

ستاری فر و فراهانی [13] در سال ۲۰۰۹ تأثیر شکل و تعداد پاس را در جوش سر به سر فولاد زنگ نزن آستنیتی با قطر ۳۲۰ و ضخامت ۱۰ میلی‌متر مورد بررسی قرار دادند. نتایج تجربی و شبیه‌سازی آن‌ها هم‌خوانی مناسبی داشت. دستگاه کرنش‌سنجی سوراخ مورد استفاده آن‌ها در این مقاله استفاده شده است. رابین و همکارانش [14] در سال ۲۰۱۱ در خطوط

لوله‌ی X70 با قطر ۱۰۱٦و ضخامت ٢٦.٢ میلی‌متر با آگاهی از خواص مکانیکی و متالورژیکی فولاد به ارزیابی تنش‌های پسماند با استفاده از تفرق اشعه‌ی ایکس پرداختند. این تحقیق نشان داد که حداکثر تنش‌های پسماند در راستای موازی منطقه متأثر از حرارت کنار جوش اتفاق می‌افتد. پادا و همکارانش [15] در سال ۲۰۱۲ تنش پسماند در جوش سر به سر (محیطی) لوله فولادی فریتی- مارتنزیتی گرید P91 را در ضخامت‌های متفاوت به‌وسیله‌ی آزمون تفرق نوترون مورد بررسی قرار دادند [15]. نتایج آن‌ها نشان داد که تنش پسماند کششی حداکثر در ناحیه‌ی مرزی منطقه‌ی متأثر از حرارت اتفاق افتاده است.

اصول و تئوری روش کرنش‌سنجی سوراخ

ایجاد یک سوراخ در یک ماده‌ی دارای تنش پسماند، باعث تغییراتی در میدان تنش می‌شود حذف کلیه‌ی تنش‌ها در سطح سوراخ، تنش را در نواحی اطراف سوراخ تغییر می‌دهد و باعث ایجاد کرنش سطحی موضعی متناسب با آن می‌شود. با اندازه گیری این کرنش‌ها و حل معادلات مربوط مقدار تنش‌ها برای ما نمایان می‌شود [16]. در شکل (۱) مکان های 2a و 2b برای کرنش‌سنج شماره‌ی ۲ نتیجه‌ی یکسانی خواهد داشت. این شکل از کرنش‌سنج سه‌تایی را اصطلاحاً رزت (Rosette) می‌نامند.



شکل ۱ آرایش کرنش‌سنج های رزتی [17].

معرفی لوله‌ی فولادی آزمایش شده

لوله‌ی فولادی مورد آزمایش از نوع درز جوش مارپیچ (اسپیرال) می‌باشد. فولاد اولیه به شکل کلاف (کویل) توسط شرکت پوسکوی کره‌ی جنوبی تهیه و در شرکت لوله و پروفیل سدید فرم‌دهی و جوشکاری شده است. نمونه‌های لوله‌ی تولید شده هم اکنون در خطوط لوله‌ی پرفشار انتقال گاز طبیعی ایران به‌کار می‌رود. جدول (۱) ترکیب شیمیایی عناصر موجود را در فولاد API X70 نشان می‌دهد [۱۸].

جدول ۱ درصد عناصر وزنی موجود در ترکیب شیمیایی لوله‌ی فولادی مورد آزمایش [۱۸]

نام عنصر	کربن	سیلیسیم	منگنز	فسفر
درصد وزنی	۰/۰۵۳	۰/۱۹	۱/٦	۰/۰۱۲
نام عنصر	کلسیم	مس	مولیبدن	نیتروژن
درصد وزنی	۰/۰۰۲۳	۰/۰۱	۰/٢٤	۰/۰۰٤٧
نام عنصر	گوگرد	کرم	نیکل	بر
درصد وزنی	۰/۰۰۰۸	۰/۰۱	۰/۱۷	۰/۰۰۰۱
نام عنصر	نیوبیوم	تیتانیوم	وانادیم	آلومینیوم
درصد وزنی	۰/۰٤۳	۰/۰۲۳	۰/۰٤٤	۰/۰٤۲

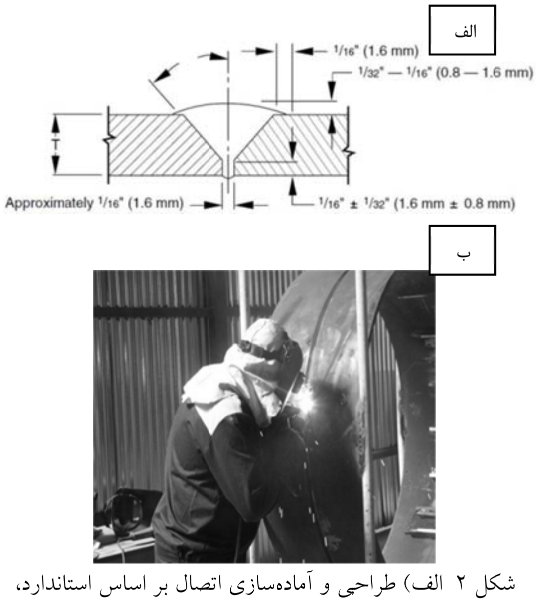
آماده‌سازی و انجام فرآیند جوشکاری

جوشکاری بر اساس استاندارد (API, AWS) در ۹ پاس، شامل پاس ریشه، گرم، پرکن و سطح و به‌ترتیب با سه قطر الکترود ۳/۲، ٤ و ٥ از ریشه تا سطح، توسط فرآیند جوشکاری قوسی الکترود دستی پوشش‌دار (SMAW) صورت گرفت. بر اساس استاندارد مربوط پاس سطحی و نهایی به‌صورت محدب به‌صورت ۳ پاس موازی ایجاد شد. جدول (۲) مشخصات فرآیند جوشکاری را نشان می‌دهد.

جدول ۲ مشخصات فرآیند جوشکاری با جریان مستقیم در هر پاس

نوع پاس	کلاس الکترود	قطرالکترود (mm)
ریشه	٦۰۱۰	۳/۲
گرم	۸۰۱۰	٤
پرکن	۸۰۱۰	٤
سطح	۸۰۱۰	۵

نوع پاس	مقدار جریان (A)	مقدار ولتاژ (V)	سرعت جوشکاری (mm/min)
ریشه	۸۰	۲۳/۲	۱۲۰
گرم	۱۰۰	۲٤	۱۳۰
پرکن	۱۲۰	۲٤/۸	۱۵۰
سطح	۱۵۰	۲٦	۱۸۰



شکل ۲ الف) طراحی و آماده‌سازی اتصال بر اساس استاندارد، ب) جوشکاری سر به سر لوله

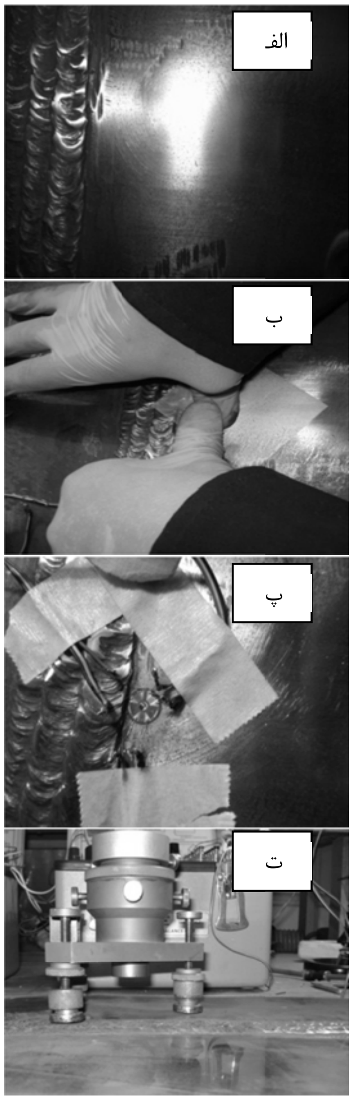
همان‌طور که در این جدول مشخص است الکترود در پاس ریشه متفاوت می‌باشد و قطر آن از سایر پاس‌ها کمتر است. طرح پخ و آماده‌سازی لوله‌ها با زاویه‌ی پخ ۳۰ درجه و پیشانی پخ 1.6 میلی‌متر مطابق با استاندارد انجام گردید. فاصله‌ی بین لوله‌ها در شعاع داخلی لوله ۳/۲ میلی‌متر و در شعاع خارجی لوله ۳٦ میلی‌متر می‌باشد. شکل (۲- الف و ب) به‌ترتیب طراحی پخ بر اساس استاندارد (API 1104) و نحوه شرایط فرآیند جوشکاری را نشان می‌دهد.

آزمون نیمه مخرب کرنش‌سنجی سوراخ

برای اندازه‌گیری تنش پسماند در عمق کمتر از ٤ میلی‌متر، از رزت (TML FR TML FRS 3) استفاده می‌شود. برای آزمایش کرنش‌سنجی سوراخ نیاز به برپایی سامانه‌ای شامل پل وتسون، نمایشگر کرنش و فرز مخصوص می‌باشد. مراحل عملی انجام این آزمون به شرح زیر می‌باشند:

۱. آماده‌سازی سطح. مراحل آماده‌سازی شامل روغن‌زدایی، سمباده‌زنی، رسم خطوط نشانه برای کرنش‌سنج و خنثی‌سازی مطابق استاندارد (ASTM E 837) انجام گرفت. به این منظور از سمباده‌ی ٤۰۰، ۸۰۰ و ۱۲۰۰ استفاده گردید (شکل ۳ -الف).
۲. تعیین موقعیت کرنش‌سنج ها: موقعیت نصب کرنش‌سنج‌ها برای اندازه‌گیری تنش‌ها با علامت‌گذاری مشخص شد. با توجه به مجاز نبودن نزدیکی نقاط مورد آزمایش بر طبق استاندارد، کرنش‌سنج‌ها بر روی یک خط عمود بر درز جوش قرار نگرفتند.
۳. نصب کرنش‌سنج‌ها. کرنش‌سنج‌ها بر روی سطح مورد نظر با دقت و با استفاده از راهنمایی شرکت سازنده چسبانده شد. (شکل ۳ ب).
٤. برقراری اتصالات. هر یک از المان‌های کرنش‌سنجی دو پایه برای اتصال سیم رابط دارد. ایجاد اتصال سیم رابط به کرنش‌سنج به روش لحیم کاری انجام گرفت
۵. نصب دستگاه ایجاد سوراخ و انجام سوراخکاری. مراحل انجام عملیات سوراخکاری طبق استاندارد مربوط صورت گرفت و کرنش‌های آزاد شده، اندازه‌گیری شد. شکل (۳- پ و ت)،

به‌ترتیب محل قرار گرفتن اولین کرنش‌سنج و نحوه قرارگیری فرز را نشان می‌دهد.

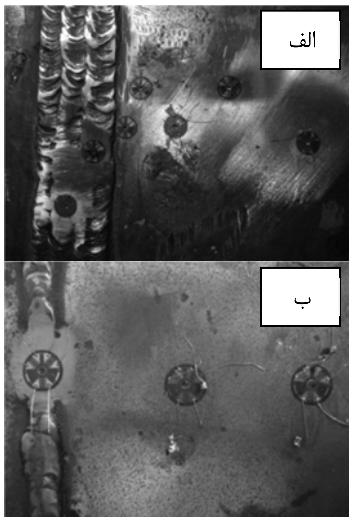


شکل ۳ مراحل آماده سازی آزمون کرنش‌سنجی سوراخ الف) سطح تمیز شده خارجی لوله پس از صیقل کاری، ب) نحوه‌ی نصب کرنش‌سنج‌ها روی سطح خارجی لوله، پ) پس از قرار دادن کرنش‌سنج، ت) دستگاه فرز قبل از شروع مراحل سوراخکاری

به این صورت آزمایش کرنش‌سنجی سوراخ در منطقه متأثر از حرارت روی سطح خارجی لوله به‌ترتیب در فواصل ٤، ۱۰، ۲۲، ٤۳ و ۷۵ میلی‌متر از لبه‌ی جوش انجام شد. در هرکدام از این نقاط پس از نصب رزت، آماده‌سازی سامانه‌ی اندازه‌گیری کرنش‌های رها شده و اطمینان از هم مرکز بودن بودن رزت و محل آزمایش، سوراخ‌کاری آغاز شد و نتایج سه متغیر کرنش در فواصل عمق ۰/۲ میلی‌متر ثبت گردید. این آزمایش تا عمق ۲ میلی‌متر ادامه پیدا کرد. افزایش بار پله‌ای به‌علت آگاهی از کرنش‌های اولیه و اطمینان از همگرایی نتایج است. عدم همگرایی در نتایج می‌تواند نشانه‌ای از تغییر تنش‌های پسماند در فواصل کم و یا نادرستی آزمایش به دلایلی هم‌چون شکستن فرز سر تخت باشد. در آزمایش کرنش‌سنجی سوراخ با توجه به سرعت بالای فرزکاری از ابزار کاربیدی استفاده می‌شد. پس از سوراخ‌کاری برای تکمیل داده‌ها به‌منظور تبدیل کرنش‌های رها شده به مقادیر تنش‌های پسماند، قطر سوراخ لحاظ گردید. پس از تکمیل آزمایش بر روی فلز پایه، آماده‌سازی سطح خارجی جوش جهت نصب رزت‌ها مطابق با استاندارد مربوط اجرا گردید. با توجه به این‌که جوش‌کاری نهایی لوله در سه پاس موازی صورت گرفته و اتصال سر به سر لوله به‌صورت متقارن لحاظ گردیده است؛ دو نقطه محل برای آزمایش روی پاس‌های کناری و مرکزی در نظر گرفته شد و مراحل انجام آزمایش به‌صورت مشابه اجرا گردید. شکل (٤- الف و ب) به‌ترتیب محل قرارگیری کلیه‌ی رزت‌ها را بر روی سطوح خارجی و داخلی لوله (پس از انجام آزمایش کرنش‌سنجی سوراخ) نشان می‌دهد.

پس از آزمایش کرنش‌سنجی سوراخ بر روی سطح خارجی لوله این آزمایش همانند مراحل قبلی بر روی سطح داخلی لوله انجام گرفت. با توجه به این‌که در شعاع داخلی لوله تنها یک منطقه‌ی جوشی وجود دارد و روند کلی تغییرات تنش مشخص شده است؛ این آزمایش تنها بر روی سه نقطه صورت گرفت. رزت‌ها به‌ترتیب در فواصل ۲۲ و ۵۵ میلی‌متر از لبه‌ی جوش و نقطه‌ی آخر روی خود جوش قرار گرفتند. با استفاده از روابط الاستیک، نتایج به‌دست آمده به مقادیر متناظر

تنش تبدیل گردید. برای تعیین خواص مکانیکی فولاد به‌منظور تبدیل کرنش‌های رها شده به مقادیر تنش، آزمون کشش بر روی نمونه‌ی تخت عمود بر درز جوش محیطی و نمونه‌ی گرد از درز جوش سر به سر بر اساس استاندارد انجام گردید. مطابق با استاندارد، گسست در منطقه‌ی درز جوش اتفاق نیفتاده است. نتایج جدول (۳) برای مقایسه بزرگی تنش‌های پسماند نسبت به استحکام تسلیم جوش و فولاد پایه استفاده می‌شود.

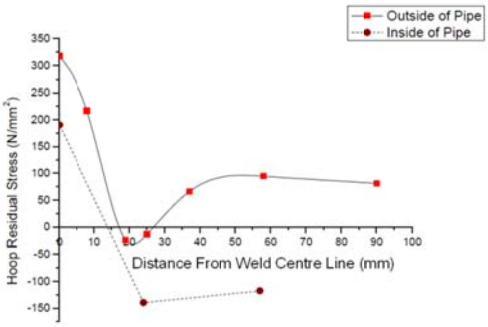


شکل ٤ آزمایش کرنش‌سنجی سوراخ، الف) روی سطح خارجی لوله، ب) روی سطح داخلی لوله

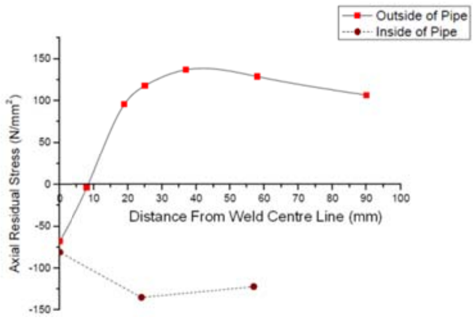
جدول ۳ نتایج آزمون کشش

نمونه	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)
نمونه‌ی تخت عمود بر درز جوش محیطی	٦٣٣	٧١٢
نمونه‌ی گرد از درز جوش سر به سر	٥٠٥	٥٩٩
نمونه	تغییر طول نسبی	نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی
نمونه‌ی تخت عمود بر درز جوش محیطی	۲۰	۰/۸۹
نمونه‌ی گرد از درز جوش سر به سر	۱۳	۰/۸٤

شکل‌های (٦ و ٥) به‌ترتیب نمودار تنش‌های پسماند محیطی و محوری نواحی جوش و متأثر از حرارت را در سطوح داخلی و خارجی لوله نشان می‌دهند.



شکل ٥ توزیع تنش‌های پسماند محیطی روی سطوح خارجی و داخلی لوله



شکل ٦ توزیع تنش‌های پسماند محوری روی سطوح خارجی و داخلی لوله

همان‌طور که در شکل‌های (٦ و ٥) مشخص است، مقدار حداکثر تنش و سطح توزیع تنش‌ها (متوسط نقاط ارزیابی تنش در یک سطح) در سطح خارجی لوله از سطح داخلی آن بیشتر است.

بحث و بررسی

ارزیابی نتایج تنش‌های پسماند

تنش‌های پسماند سطح خارجی لوله. نتایج نشان می‌دهد که بر روی لوله مقدار قابل توجهی تنش‌های پسماند کششی محیطی (در راستای موازی جوش) ایجاد شده است. در مرکز منطقه‌ی جوش (پاس وسط)

این تنش برابر ۳۱۸ مگاپاسکال از نوع کششی است که بیش از ٦۰ درصد استحکام تسلیم فلز جوش (۵۰۵ مگاپاسکال) می‌باشد (شکل ۵). با توجه به صلبیت منطقه‌ی جوش و درجه مهار بالا انتظار می‌رفت که میزان این تنش به استحکام تسلیم فلز جوش نزدیک‌تر باشد. این اختلاف احتمالاً ناشی از نهایی بودن پاس، فقدان عملیات حرارتی پس از آن و در نتیجه وجود مقادیر قابل‌توجهی فاز حجیم مارتنزیت می‌باشد که سبب متعادل شدن تنش‌های پسماند کششی می‌گردد. در سطح خارجی لوله، مرکز منطقه‌ی پاس کنار جوش (مجاور پاس وسط)، میزان تنش‌های پسماند کششی برابر ۲۱۷ مگاپاسکال و در حدود ٤۲ درصد استحکام تسلیم منطقه‌ی جوش ارزیابی گردیده است. برای تعیین درصد تنش پسماند نسبت به استحکام تسلیم از نتایج جدول (٤) استفاده شده است. در منطقه‌ی متأثر از حرارت (کنار جوش) جهت تنش‌های پسماند عوض شده و به‌صورت فشاری است. با توجه به صلبیت سازه و در نظر داشتن رفتار خود متعادل شونده‌ی تنش‌های پسماند، تغییر جهت این تنش‌ها نسبت به ناحیه‌ی درز جوش طبیعی به نظر می‌رسد. در فاصله‌ی ٤ میلی‌متر از لبه‌ی جوش میزان تنش پسماند (برابر ٢٤- مگاپاسکال)، ۵ درصد استحکام تسلیم فولاد پایه (٦٣٣ مگاپاسکال) در منطقه‌ی متأثر از حرارت است. به‌علت عدم امکان چسباندن صحیح و مطابق با استاندارد کرنش‌سنج‌ها در فاصله‌ی نزدیک‌تر به لبه‌ی جوش (منطقه ذوب جزئی)، ارزیابی تنش‌های پسماند در این ناحیه صورت نگرفت. با توجه به کران‌های با جهت‌های مخالف بدیهی است، در منطقه‌ای از این فاصله تنش پسماند صفر شده و جهت تنش‌ها تغییر یافته است. این منطقه از رفتار دوگانه‌ای پیروی می‌کند. در این منطقه ذوبی اتفاق نیفتاده است، اما فولاد به‌صورت خمیری در می‌آید. بنابر این فلز پایه‌ی مجاور ناحیه‌ی جوش مقداری از صلبیت خود را از دست داده و رفتاری مشابه جوش از خود نشان می‌دهد. هم‌چنین با توجه به سیکل حرارتی شدید، وجود ساختار مارتنزیت و درشت دانه شدن ساختار فولاد در این ناحیه اجتناب‌ناپذیر است. بنابراین انتظار رفتاری بین نواحی جوش و فلز پایه منطقی به نظر می‌رسد. میزان تنش پسماند در فاصله‌ی ۱۰ میلی‌متری از منطقه‌ی جوش هم‌چنان فشاری است، اما مقدار آن به ۱۳- مگاپاسکال کاهش یافته و به ۳ درصد استحکام تسلیم فولاد پایه در منطقه‌ی متأثر از حرارت رسیده است. این مقدار در فواصل بیشتر از درز جوش به حالت کششی در می‌آید. برای تقریب توزیع تنش‌های پسماند از منحنی اسپلاین (Spline) درجه سه جهت درون یابی نقاط مورد آزمایش استفاده شده است. قرار گرفتن تقریبی این مقادیر به‌صورت یک منحنی ملایم و خوش رفتار را می‌توان ناشی از کاهش سیکل‌های حرارتی در مناطق دور از درز جوش (و عدم ایجاد تنش‌های پسماند بالا در حد استحکام تسلیم ماده در ناحیه‌ی جوش) دانست. به عبارت دیگر تغییر شکل پلاستیک در این مناطق اتفاق نمی‌افتد. تغییر شکل پلاستیک سبب بروز رفتار غیرخطی تنش و کرنش می‌گردد. هم‌چنین چنان‌چه میزان تنش‌های پسماند خیلی بالا باشد روش کرنش‌سنجی سوراخ به‌علت از بین رفتن رابطه‌ی خطی تنش و کرنش مورد تأیید استاندارد نیست. تنش‌های پسماند محیطی در مناطق دورتر از مرکز درز جوش رفتار ثابت کششی (معادل ۹۰ مگاپاسکال) از خود نشان می‌دهند که احتمالا ناشی از مراحل مختلف تولید لوله است.

نتایج نشان می‌دهد که در راستای عمود بر جوش، تنش‌های پسماند فشاری (برابر با ٦٨- مگاپاسکال) در مرکز منطقه جوش ایجاد شده است (شکل ٦). این منطقه تحت دو اثر هم زمان اعوجاج زاویه‌ای و انقباض طولی جوش است. تغییر شکل زاویه‌ای تمایل به کشیدن سطح خارجی جوش دارد که متقابل با انقباض طولی قرار می‌گیرد که تمایل به کشیدن جوش در داخل لوله دارد. بنابراین انتظار می‌رود که این

تنش‌ها تقریباً برابر صفر بر روی مرکز جوش باشند. وجود این مقدار تنش منفی را باید ناشی از وجود فاز مارتنزیت در این ناحیه دانست. در منطقه‌ی پاس کناری این میزان تنش پسماند فشاری تا ٤ مگاپاسکال کاهش می‌یابد. این میزان با افزایش فاصله از منطقه‌ی جوش یک روند تدریجی را دنبال می‌کند و کرنش‌سنج در فاصله‌ی ۲۰ میلی‌متری از لبه‌ی جوش بیشترین میزان تنش پسماند کششی محوری را ۱۳۷ مگاپاسکال ارزیابی می‌نماید. علت افزایش این تنش‌ها احتمالاً در طراحی پخ اتصال (درز جوش) می‌باشد. در جوش‌های یک‌جهته، اعوجاج زاویه‌ای با خوابیدن هر پاس به‌صورت پیوسته افزایش می‌یابد که با افزایش درجه‌ی قید، باعث تنش‌های خمشی پسماند قابل‌توجه در ناحیه‌ی کناری مرکز جوش می‌شود. به نظر می‌رسد با توجه به طبیعت ذاتی خود متعادل شونده تنش‌های پسماند، ارزیابی این تنش‌ها در فواصل دورتر (بالای ۲۰۰ میلی‌متر از مرکز درز جوش) از میزان تنش‌های پسماند کششی به تدریج کاسته و به صفر نزدیک خواهند شد.

تنش‌های پسماند سطح داخلی لوله. به‌منظور اندازه‌گیری تنش‌های پسماند سطح داخلی لوله در سه نقطه، آزمایش کرنش‌سنجی سوراخ انجام شد. با توجه به تک پاسه بودن پاس ریشه، یک نقطه به مرکز ناحیه‌ی جوش اختصاص یافت. در راستای موازی جوش تنش‌های پسماند محیطی از نظر کیفی روندی شبیه به خارج لوله را دنبال می‌کند، اما مقدار آن از نظر کمی میزان قابل‌توجهی متفاوت است. به نظر می‌رسد تنش‌های پسماند کششی در داخل لوله نسبت به خارج از لوله به میزان مشخصی افت پیدا کرده اند. در مرکز ناحیه‌ی جوش تنش پسماند کششی برابر ۱۹۱ مگاپاسکال است و حدود ٤۰ درصد کاهش را نسبت به نقطه‌ی متناظر سطح خارجی لوله نشان می‌دهد (شکل ٥). میزان تنش پسماند فشاری در منطقه‌ی متأثر از حرارت سطح داخلی لوله و در فاصله‌ی ۲۲ میلی‌متری از لبه‌ی جوش برابر ۱۳۹- مگاپاسکال و در حدود ٦ برابر نقطه‌ی حداکثر تنش پسماند فشاری بر روی سطح خارجی لوله است. با توجه به افزایش مشهود مقدار حداکثر تنش‌های پسماند فشاری احتمال دارد محل وقوع حداکثر تنش‌های پسماند فشاری داخل لوله در فاصله ای دورتر از لبه جوش اتفاق افتاده باشد. نقطه‌ی سوم که در فاصله‌ی دورتر از مرکز جوش در فاصله‌ی ٥۷ میلی‌متری قرار دارد دارای مقدار تقریباً مشابه تنش (۱۱۷- مگاپاسکال) نسبت به منطقه‌ی تقریباً متناظر سطح خارجی لوله است (اما جهت آن متفاوت می‌باشد و به‌صورت فشاری است). وجود این تنش‌ها می‌تواند ناشی از فرآیند شکل‌دهی غلتکی به‌صورت مارپیچ به‌منظور تولید لوله باشد که در شعاع داخلی تنش‌های فشاری و در شعاع خارجی تنش‌های کششی ایجاد می‌نماید. بنابر این علاوه بر اثرات حرارت ورودی ناشی از عواملی هم‌چون شدت جریان الکتریکی، اندازه‌ی قطر الکترود و سرعت جوشکاری، تنش‌های اولیه ناشی از مراحل تولید نیز در میزان و اختلاف تنش‌های پسماند جوشی در سطوح داخل و خارج لوله تأثیرگذار است. به‌طور کلی می‌توان افت سطح تنش‌های پسماند محیطی در سطح داخل لوله نسبت به سطح خارج آن را ناشی از متغیرهای جوشکاری، حرارت ورودی، تنش‌های باقیمانده از ساخت، زاویه گپ و اندازه‌ی درز متفاوت جوش، شکل‌گیری کرنش‌های ماندگار ناشی از قرار گرفتن پاس ریشه، وجود فاز مارتنزیت و عدم تنش‌گیری در پاس سطح دانست. بر خلاف تنش‌های پسماند محیطی (در راستای موازی جوش)، تنش‌های پسماند کششی محوری در سطح داخلی لوله از نظر کیفی روندی کاملاً متضاد و متقابل را نسبت به سطح خارج لوله دنبال می‌کند (شکل ٦). در مرکز ناحیه‌ی جوش، تنش پسماند برابر۸۱- مگاپاسکال و تقریباً با مقدار ارزیابی شده در نقطه‌ی متناظر سطح خارجی لوله برابر است. در منطقه‌ی متأثر از حرارت در فاصله‌ی ۲٤ میلی‌متری از مرکز جوش، تنش‌های پسماند فشاری بالا (۱۳٥- مگاپاسکال) و در نقطه‌ی دورتر (فاصله ٥۷

میلی‌متر از مرکز جوش) میزان تنش پسماند کاهش می‌یابد (تا سطح ۱۲۲- مگاپاسکال). جالب است که جمع تنش پسماند در نقاط تقریباً متناظر داخل و خارج لوله در حدود صفر است.

تنش‌های پسماند در ضخامت لوله. روش کرنش‌سنجی سوراخ تنها برای ارزیابی تنش‌های سطحی کاربرد دارد و نمی‌تواند میزان تنش‌های عمقی را ارزیابی نماید. بنابراین روش قادر به ارزیابی تنش‌های پسماند شعاعی نیست. با عنایت به این‌که این لوله جدار نازک می‌باشد سطح این تنش‌ها بسیار محدود بوده و قابل چشم‌پوشی است. از سوی دیگر با توجه به ۹ پاسه بودن جوش و تنش‌گیری هر پاس در اثر حرارت پاس بعدی که به‌عنوان عملیات حرارتی بعد از جوش عمل می‌کند؛ همین مقدار اندک نیز به صفر متمایل شده و مقادیر محوری و محیطی نیز متعادل می‌گردند. بنابر این مقادیر حداکثر تنش‌های پسماند جوشی بر روی سطوح خارجی و داخلی لوله اتفاق خواهد افتاد. با توجه به بیشتر بودن تنش‌های کششی نسبت به تنش‌های فشاری به نظر می‌رسد سطح خارج لوله نسبت به سطح داخل آن منطقه بحرانی‌تری است. هم‌چنین از نظر تنش‌های محیطی، مرکز ناحیه‌ی جوش و از نظر تنش‌های محوری، منطقه‌ی متأثر از حرارت (در فاصله‌ی حدودی ۳۰ میلی‌متر از مرکز جوش) را می‌توان به‌عنوان ناحیه بحرانی شناسایی کرد.

نتیجه‌گیری

بزرگی و توزیع تنش‌های پسماند قبل از ساخت مشخص نیست و ایمنی سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نتایج ارزیابی تنش در جوش سر به سر فولاد میکروآلیاژی خطوط لوله انتقال گاز را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

۱. تنش پسماند محیطی (همراستا با جوش) در سطح خارجی لوله به‌صورت کششی است و بیشترین مقدار آن برابر با ۳۱۸ مگاپاسکال در مرکز جوش اتفاق افتاده است. با توجه به رفتار ذاتی خود متعادل شونده‌ی تنش‌های پسماند، مقدار آن در منطقه متأثر از حرارت به‌صورت فشاری درآمده است.

۲. تغییرات کیفی و روند کلی تنش‌های پسماند محیطی در سطوح داخل و خارج لوله رفتارهای تقریباً مشابه به هم دارند. با این وجود تنش‌های پسماند منطقه متأثر از حرارت مناطق دورتر از مرکز درز جوش در سطح خارج از لوله به‌صورت کششی و در سطح داخل آن به‌صورت فشاری است.

۳. مقدار تنش‌های پسماند محوری (عمود بر درز جوش) در مرکز درز جوش سطوح داخل و خارج لوله نزدیک به هم است اما با فاصله گرفتن از مرکز جوش رفتاری معکوس نسبت به هم را نشان می‌دهند.

٤. بیشترین مقدار تنش پسماند محوری در منطقه متأثر از حرارت (فاصله حدودی ۳۰ میلی‌متر از مرکز جوش) اتفاق افتاده است و میزان آن در سطح خارج لوله به‌صورت کششی (برابر با ۱۳۷ مگاپاسکال) و در سطح داخل لوله به‌صورت فشاری (برابر با ۱۳۵ مگاپاسکال) می‌باشد.

بنابراین در جوش سر به سر لوله‌ی قطور انتقال گاز طبیعی ایران راستای محیطی سطح خارجی لوله، منطقه‌ی ویژه (بحرانی) است و دارای بیشترین تنش پسماند کششی است. در مطالعات بعدی با بهره‌گیری از آزمون‌های کوانتومتری، متالوگرافی، ضربه و سختی‌سنجی اثر این تنش‌ها بر رفتار متالورژیکی و مکانیکی مناطق جوش و متأثر از حرارت بررسی خواهد شد.

مراجع

۱. مقدمه کتاب خلاصه مقالات اولین کنفرانس لوله و صنایع وابسته، شرکت ملی گاز ایران، تهران، (۱۳۸٦).

2. "New Joining Technology for Metal Pipe in the Construction Industry", Construction Industry Institute & Breakthrough Strategy Committee, Texas, pp.15-35, (2003).

۳. کوکبی، امیرحسین، "تکنولوژی جوشکاری"، نشر آزاده، تهران، (۱۳۸۸).

٤. حائری، محمود، "بررسی متالورژیک عیوب در جوش"، نشر کیانا، تهران، (۱۳۸۳).

5. Gladman, T., "The Physical Metallurgy of Microalloyed Steels", Institute of Materials, London, pp. 175-193, (1997).

٦. سبک روح، مجید، "بررسی علل ترک‌خوردگی جوش در لوله‌های حامل سیال"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشکده‌ی مکانیک، دانشگاه مازندران، (۱۳۸۷).

7. "Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures" British Standards Institution, BS7910, (2001).

۸. فراهانی، محمدرضا، "بررسی طراحی اتصال جوش بر بزرگی و توزیع تنش‌های پسماند"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشکده‌ی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، (۱۳۸۵).

9. Bouchard, R.P.J., "Validated residual stress profiles for fracture assessments of stainless steel pipe girth welds", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol.84, 195-222, (2007).

10. Leggatt, R.H., "Residual stresses in welded structures", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol.85, 144-151, (2008).

11. Kandil, F., Lord, J., Fry, A., Grant, P., "Measurement of residual stress in components, a review of residual stress measurement methods", NPL Report, pp. 23-37, (2001).

12. "Handbook of Measurement of Residual Stress", Society for Experimental Mechanics, 1st edition, 2-7, (1996).

13. Sattari-Far, I., Farahani, M.R., "Effect of the weld groove shape and pass number on residual stresses in butt-welded pipes", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 86, pp. 723-731, (2009).

14. Ruibin, G., Yiliang, Z., Xuedong, X., Liang, S., Yong, Y., "Residual stress measurement of new and in-service X70 pipelines by x-ray diffraction method", NDT&E International, Vol. 44, pp. 397-393, (2011).

15. Paddea, S., Francis, J.A., Paradowska, A.M., Bouchard, R.P.J., Shibli, I.A.," Residual stress distributions in a P91 steel-pipe girth weld before and after post weld heat treatment", Materials Science and Engineering, Vol. 534, pp. 663–672, (2012).

16. "Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method", ASTM Standard E 837 , (2003).

17. "Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method", Tech Note TN-503503, Micro-Measurements, 19-33, (2010).

۱۸. فروزان، محمدرضا، حیدری، علی، گلستانه، سیدجعفر، "شبیه‌سازی اجزای محدود فرآیند جوشکاری زیرپودری لوله‌های API 5L-X70 با درز جوش مستقیم مورد استفاده در صنایع نفت و گاز"، استقلال، اصفهان، شماره ۱، صفحه ۹۳-۱۱۰، (۱۳۸۸).